

实用焊接技术丛书

切割技术及应用



李亚江 等编著



化学工业出版社

工业装备与信息工程出版中心

实用焊接技术丛书

切割技术及应用

李亚江 等编著



化学工业出版社
工业装备与信息工程出版中心

· 北 京 ·

(京) 新登字 039 号

图书在版编目(CIP)数据

切割技术及应用/李亚江等编著. —北京: 化学工业出版社, 2004

(实用焊接技术丛书)

ISBN 7-5025-5600-1

I. 切… II. 李… III. 金属-切割 IV. TG48

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2004) 第 050239 号

实用焊接技术丛书

切割技术及应用

李亚江 等编著

责任编辑: 任文斗

文字编辑: 韩庆利

责任校对: 陈 静 宋 玮

封面设计: 潘 峰

*

化 学 工 业 出 版 社 出版发行

工业装备与信息工程出版中心
(北京市朝阳区惠新里 3 号 邮政编码 100029)

发行电话: (010) 64982530

<http://www.cip.com.cn>

*

新华书店北京发行所经销

北京永鑫印刷有限责任公司印刷

三河市前程装订厂装订

开本 787mm×1092mm 1/16 印张 18 字数 443 千字

2004 年 7 月第 1 版 2004 年 7 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5025-5600-1/TH·205

定 价: 38.00 元

版权所有 违者必究

该书如有缺页、倒页、脱页者, 本社发行部负责退换

前 言

对现代工业而言,切割和焊接同样都是应用量大、覆盖面广的重要技术领域。随着科学技术的发展,切割技术也有了快速发展。最近十几年来,新的切割技术的开发和应用取得了长足的发展,切割技术已经从传统的火焰切割发展成为包括等离子弧切割、激光切割、高压水射流切割等多种工艺方法在内的现代切割技术,成为现代工业生产中不可缺少的一个组成部分。切割技术的应用领域十分广阔,几乎覆盖了机械、造船、军工、石油化工、冶金、能源、车辆制造、航空航天等各个工业部门。

切割是焊接的前道工序,因为被焊工件所需的几何形状和尺寸,绝大多数情况下是通过切割方法来实现的。现代焊接生产中金属材料的切割主要采用热切割,因为热切割很少受切割材料的厚度、形状和尺寸的限制,而且易于实现机械化和自动化。工程中常用的热切割方法几乎可以切割所有的工程材料。

本书从实用性角度对工程中常用的切割技术及应用作了简明阐述,力求突出新颖性、实用性和先进性等特色。本书主要针对气体火焰切割、电弧切割、等离子弧切割、激光切割、高压水射流切割、电火花切割等一些常用和特殊的切割方法,突出了各种切割方法的工艺特点和应用。并且,给出了具体的切割工艺参数、相关技术数据及针对一些典型工程结构产品的切割应用实例,可以指导工程应用场合的切割生产。书中选用了实际生产中的一些切割新工艺和成功经验,反映了当前切割技术的最新应用现状。

本书是《实用焊接技术丛书》中的一本,是一本以从事焊接与切割的技术人员和操作工人作为读者对象的技术图书。在此,向关心本书出版的焊接界同行及所援引文献的作者表示诚挚的谢意,这些文献资料充实了本书的内容,推动了我国切割技术的发展和應用。

本书主要供从事与焊接及切割技术相关的工程技术人员、管理人员和操作人员使用,也可供高等院校、科研单位的有关教学和科研人员参考。

其他写作人员还有:张永喜、王娟、刘鹏、郝滨海、赵越、陈茂爱、孙俊生、高进强、郭国林、张永兰、王芳、马海军、沈孝芹、黄海啸、何卓宁、刘强、张燕、周冰、石海玉、孙宾等。

由于我们水平有限,错误和疏漏之处在所难免,敬请广大读者批评指正。

李亚江

2004年4月2日

内 容 提 要

本书从实用性角度对工程中常用的切割技术及应用作了简明阐述,力求突出新颖性、实用性和先进性等特色。本书主要针对气体火焰切割、电弧切割、等离子弧切割、激光切割、高压水射流切割、电火花切割等一些常用和特殊的切割方法,突出了各种切割方法的工艺特点和应用。并且,给出了具体的切割工艺参数、相关技术数据及针对一些典型工程结构产品的切割应用实例,可以指导工程应用场合的切割生产。本书内容选用了一些切割新工艺和成功的经验,书中的数据大多选自近几年的技术资料,反映了当前切割技术的最新应用现状。

本书主要供从事与焊接及切割技术相关的工程技术人员、管理人员和操作人员使用,也可供高等院校、科研单位的有关教学和科研人员参考。

目 录

第 1 章 概述	1
1.1 切割方法的分类及发展	1
1.1.1 切割方法的分类特点	1
1.1.2 切割技术及应用现状	5
1.2 切割方法的选择	9
1.2.1 选择切割方法应考虑的因素	9
1.2.2 切割技术的适用范围	9
1.2.3 切割技术的新发展	11
第 2 章 气体火焰切割	14
2.1 气体火焰切割原理、分类及特点	14
2.1.1 气体火焰切割原理	14
2.1.2 气割的分类、特点及应用范围	16
2.2 气体火焰切割工具及装置	17
2.2.1 气体火焰切割装置的组成	17
2.2.2 气割用气体	35
2.3 气体火焰切割工艺及参数	38
2.3.1 影响气割过程的主要因素	38
2.3.2 气割的工艺参数	39
2.3.3 气体火焰切割的工艺要点	41
2.3.4 气割缺陷及防止措施	45
2.4 气体火焰切割技术	46
2.4.1 坡口的气割	46
2.4.2 钢件的气体火焰切割	50
2.4.3 多层叠板的气割	54
2.4.4 圆钢和钢管的气割	56
2.4.5 难切割材料的气割	57
2.5 其他气体火焰切割工艺	60
2.5.1 氧-丙烷气体切割	60
2.5.2 液化石油气切割	62
2.5.3 高速、高效气割工艺	62
2.5.4 氧-熔剂切割	64
2.5.5 水解氢-氧火焰切割	67
2.6 气体火焰切割实例	68
2.6.1 不同形状钢板的切割	68
2.6.2 用割圆规割法兰盘和半圆弧	69

2.6.3	轴套、铆钉及平钉的切割	70
2.6.4	其他复杂工件的切割	71
2.7	气割质量与安全	73
2.7.1	切割面质量与尺寸偏差	73
2.7.2	气割安全与防护	74
2.7.3	气割配件的使用安全	76
第3章	电弧切割	77
3.1	电弧切割的分类及特点	77
3.1.1	电弧切割的分类	77
3.1.2	电弧切割的原理	77
3.1.3	电弧切割的应用范围	77
3.2	电弧切割的设备	78
3.2.1	电弧切割设备原理及组成	78
3.2.2	电弧切割设备的技术参数	80
3.3	电弧切割工艺	81
3.3.1	电弧切割的工艺特点	81
3.3.2	电弧切割的工艺参数	81
3.4	电弧切割的应用实例	84
3.4.1	钢铁材料的电弧切割	84
3.4.2	有色金属的电弧切割	85
第4章	等离子弧切割	88
4.1	等离子弧切割的特点及分类	88
4.1.1	等离子弧切割的特点	88
4.1.2	等离子弧切割的工作原理	89
4.1.3	等离子弧切割方法分类	90
4.2	等离子弧切割设备	94
4.2.1	等离子弧切割设备的组成	94
4.2.2	设备的控制程序	107
4.3	等离子弧切割工艺	107
4.3.1	气体选择	107
4.3.2	切割工艺参数	109
4.3.3	等离子弧切割质量	114
4.4	特种等离子弧切割方法	118
4.4.1	脉冲等离子弧切割	118
4.4.2	微束等离子弧切割及双弧切割	118
4.4.3	双层气流等离子弧切割	119
4.4.4	水再压缩等离子弧切割和水下切割	119
4.4.5	漩涡水稳定电弧等离子弧切割	120
4.4.6	气保护电极氧气等离子弧切割	120
4.5	环境控制及安全防护	121

4.5.1	环境控制	121
4.5.2	安全防护	121
第5章	激光切割	123
5.1	激光切割原理、分类及特点	123
5.1.1	激光切割原理及分类	123
5.1.2	激光切割的特点	124
5.1.3	激光切割的应用范围	125
5.2	激光切割设备	125
5.2.1	激光切割设备的组成	125
5.2.2	激光切割用激光器	126
5.2.3	割炬	129
5.2.4	激光切割设备的技术参数	130
5.3	激光切割工艺	135
5.3.1	激光切割的工艺参数	135
5.3.2	激光切割的操作程序及技术要点	139
5.3.3	激光切割的质量	140
5.4	激光切割的应用	143
5.4.1	钢铁材料的激光切割工艺	143
5.4.2	有色金属的激光切割工艺	149
5.4.3	非金属材料的激光切割工艺	154
5.5	激光切割的安全与防护	155
5.5.1	激光对人体的危害	155
5.5.2	激光的安全防护	156
第6章	水下切割	157
6.1	水下切割的分类及特点	157
6.1.1	水下切割的分类	157
6.1.2	水下切割的特点	159
6.1.3	水下切割的应用范围	161
6.2	水下切割设备及材料	162
6.2.1	水下切割设备	162
6.2.2	切割材料	167
6.3	水下切割工艺	170
6.3.1	水下切割的工艺参数	170
6.3.2	水下电弧-氧切割工艺	176
6.3.3	水下等离子弧切割工艺	179
6.4	水下切割的应用	179
6.4.1	钢铁材料的水下切割	179
6.4.2	有色金属的水下切割	180
6.5	水下切割的安全与防护	181
6.5.1	水下切割的安全注意事项	181

6.5.2 水下切割的防护	182
第7章 高压水射流切割	184
7.1 高压水射流切割的分类及特点	184
7.1.1 高压水射流切割的分类	184
7.1.2 高压水射流切割的特点	185
7.2 高压水射流切割设备及装置	188
7.2.1 高压水射流切割设备	188
7.2.2 高压水射流切割装置	189
7.2.3 高压水射流切割设备的技术参数	193
7.3 高压水射流切割工艺	193
7.3.1 高压水射流切割的工艺特点	193
7.3.2 高压水射流切割的工艺参数及影响因素	195
7.3.3 高压水射流切割的工艺参数示例	201
7.4 高压水射流切割的应用	205
7.4.1 高压水射流切割的应用范围	205
7.4.2 高压水射流切割应用示例	206
7.4.3 高压水射流的其他加工工艺	209
7.5 高压水射流切割缺陷、设备维护及安全	211
7.5.1 高压水射流切割缺陷及防止	211
7.5.2 高压水射流切割设备维护	213
7.5.3 高压水射流切割的操作安全	215
第8章 碳弧气刨与切割	216
8.1 碳弧气刨与切割的原理及特点	216
8.1.1 碳弧气刨原理	216
8.1.2 碳弧气刨的分类及特点	216
8.1.3 碳弧气刨的应用范围	217
8.2 碳弧气刨工具与装置	217
8.2.1 碳弧气刨设备	217
8.2.2 碳弧气刨装置的组成	219
8.2.3 碳弧气刨的技术参数	224
8.3 碳弧气刨与切割工艺	226
8.3.1 碳弧气刨的工艺特点	226
8.3.2 碳弧气刨的工艺参数	228
8.4 碳弧气刨与切割应用实例	230
8.4.1 钢铁材料的碳弧气刨	230
8.4.2 铸铁及不锈钢的碳弧切割	234
8.5 碳弧气刨与切割的操作与安全	235
8.5.1 碳弧气刨的操作	235
8.5.2 碳弧气刨的安全防护	235
第9章 电火花切割	236

9.1 电火花切割原理、分类及特点	236
9.1.1 电火花切割原理及分类	236
9.1.2 电火花切割的特点	236
9.1.3 电火花切割的应用范围	237
9.2 电火花切割设备	237
9.2.1 电火花切割设备的组成与分类	237
9.2.2 电火花切割脉冲电源及技术参数	240
9.3 电火花切割工艺	244
9.3.1 电火花切割的工艺流程	244
9.3.2 电火花切割前的准备	245
9.3.3 电火花切割工件的预加工	248
9.3.4 电火花切割工艺参数	250
9.3.5 电火花切割的质量	253
9.4 电火花切割应用	257
9.4.1 冷冲压模的加工	257
9.4.2 薄片类金属零件的切割	258
9.4.3 超厚工件的切割	259
9.5 电火花切割的操作与安全	261
9.5.1 电火花切割的安全技术规程	261
9.5.2 电火花切割设备的使用规则	261
9.5.3 电火花切割设备的保养及故障处理	262
第10章 其他切割方法	265
10.1 超声波切割	265
10.1.1 超声波切割原理及特点	265
10.1.2 超声波切割设备	265
10.1.3 超声波切割工艺特点	266
10.1.4 超声波切割的应用	268
10.2 电子束切割	269
10.2.1 电子束切割原理及特点	269
10.2.2 电子束切割装置	270
10.3 锯割	271
10.3.1 锯条及锯片	271
10.3.2 锯割工艺	274
10.3.3 锯割的应用	275
参考文献	277

第1章 概 述

切割是焊接生产备料工序的重要加工方法，包括冷、热两类切割，而热切割又有气体火焰切割、电弧切割、等离子弧切割和激光切割等各种工艺方法。目前各种金属和非金属材料的切割已经成为现代工业生产（特别是焊接生产）中的一个重要工序，因为被焊工件所需要的几何形状和尺寸，绝大多数是通过切割方法来实现的。切割技术被广泛应用在国民经济建设的各个领域。

1.1 切割方法的分类及发展

1.1.1 切割方法的分类特点

近年来，切割技术的开发和应用取得了长足的发展，切割技术已经从传统的火焰切割发展到包括等离子切割、激光切割、高压水射流切割等在内的现代切割技术。现代工程材料切割的方法有很多种，大致可归纳为冷切割和热切割两大类。

冷切割是在常温下利用机械方法使材料分离，如剪切、锯切（条锯、圆片锯、砂片锯等）、铣切等，也包括近年来发展的水射流切割。

热切割是利用热能使材料分离，最常见的有气体火焰切割、等离子弧切割和激光切割等。现代焊接生产中钢材的切割主要采用热切割。

热切割按物理现象可分为燃烧切割、熔化切割和升华切割三类，所有切割方法都是混合型的。燃烧切割是材料在切口处采用加热燃烧、产生的氧化物被切割氧流吹出而形成切口；熔化切割是材料在切口处主要采用加热熔化、熔化产物被高速及高温气体射流吹出而形成切口；升华切割是材料在切口处主要采用加热汽化、汽化产物通过膨胀或被一种气体射流吹出而形成切口。

按照所用能源不同，热切割方法可分类如下。

(1) 采用气体火焰的热切割

① 气割 采用气体火焰的热能将工件切割处预热到一定温度后，喷出高速切割氧流，使其燃烧并放出热量实现切割。

② 氧-熔剂切割 在切割氧流中加入纯铁粉或其他熔剂，利用它们的燃烧和造渣作用实现气割。

(2) 采用气体放电的热切割

① 电弧-氧切割 利用电弧加切割氧进行切割，电弧在空心电极与工件之间燃烧，由电弧和材料燃烧时产生的热量使材料能通过切割氧进行连续燃烧，熔融物被切割氧排出，反应过程沿移动方向继续进行而形成切口。

② 电弧-压缩空气气刨 利用电弧及压缩空气在表面进行切割，由电弧和材料燃烧时产生热量使材料能够连续地熔化及燃烧。反应过程沿移动方向继续发展，由压缩空气流驱除熔融物及熔渣而形成切口。

③ 等离子弧切割 利用等离子弧的热能实现切割。

a. 转移弧等离子弧切割，工件处于切割电流回路内，被切割的材料必须是导电的。

b. 工件不需处于切割电流回路内，可以切割导电的及不导电的材料。

(3) 利用束流的热切割

① 激光切割 利用激光束的热能实现切割。

② 电子束切割 利用电子束的能量将被切割材料熔化，熔化物蒸发或靠重力流出而产生切口。

根据切割过程所用能源对切割方法的分类及适用材料见表 1.1。

表 1.1 根据切割过程所用能源对切割方法的分类及适用材料

所用能源	切割方法	第二层次分类	适用材料
光能	激光切割	燃烧切割 熔化切割 升华切割	金属材料、塑料、陶瓷
	氧作辅助气体的激光切割		最适用于金属材料
化学反应能	氧气切割	—	碳钢、低合金钢
	氧-熔剂切割	—	
电能	电弧-氧切割	—	金属材料(不适用于塑料、陶瓷)
	等离子弧切割	Ar 等离子弧切割	适用于金属,可以切割塑料等,不适用于陶瓷
		N ₂ 等离子弧切割	
		O ₂ 等离子弧切割	
		空气等离子弧切割	
		水压缩等离子弧切割	
	钨极电弧切割	—	可用于金属,但不甚适合
	熔化极电弧切割	—	金属材料
	碳弧切割	—	金属材料
	电弧锯切割	—	金属材料
	电火花切割(线切割)	—	金属材料(模具加工最合适)
	阳极切割	—	高硬度淬火钢、硬质合金等
动能	气射流切割	—	金属、塑料(可用,但不太适合)
	水射流切割	纯水射流切割	金属(仅适用于薄板)、塑料(最适用)
		加磨料水射流切割	金属、塑料,也可用于陶瓷
机械能	剪切	—	金属、塑料、陶瓷
	锯切	条锯、圆片锯、砂片锯	
	铣切	—	
其他	电解切割	—	金属材料

表 1.1 中有些切割方法兼用两种能源，如电弧-氧切割法，既利用电弧热，又利用氧化反应热。氧作辅助气体激光切割金属时，既利用光能，也利用化学反应热。

热切割是焊接生产中最常用的金属切割加工方法，热切割方法的分类、定义及其适用范围见表 1.2。

表 1.2 热切割方法的分类、定义及其适用范围

切割方法	定 义	适 用 范 围
利用氧化反应热的切割方法	气割 利用预热火焰加热切割区并送进高纯度切割氧流,借助氧与铁(或金属)的反应使金属迅速氧化,同时用高速切割氧流的动量将熔渣排除,从而形成割缝的切割方法	主要适用于切割碳钢、低合金钢和钛
	氧-熔剂气割 在气割的过程中,通过氧流向切割反应区运送熔剂(铁粉等),利用熔剂的燃烧热将高熔点金属氧化物熔化,同时借助高速切割氧流排除熔渣和熔融金属,从而形成割缝的切割方法	主要适用于切割高铬钢和铬镍不锈钢、铸铁的浇冒口以及钢渣等
利用电弧热的切割法	空气碳弧切割 利用碳极电弧的热量使金属局部熔化,借助压缩空气流将熔化金属吹除,从而形成槽道或割缝的切割方法	主要适用于各种金属焊接接头的开坡口、封底焊缝的清根和开槽以及清除焊缝中的焊接缺陷,也可用于割断有色金属及其合金
	MIG 电弧切割 利用熔化极气体保护电弧的热量使金属局部熔化,并借助保护气体的气流吹除熔化金属,从而形成割缝的切割方法	主要适用于水下切割金属,也用于接缝开槽
	等离子弧切割 利用等离子弧高温使金属局部熔化,并借助高速等离子焰流的动量将熔化金属排除,从而形成割缝的切割方法	适用于切割所有金属材料及部分非金属材料,是切割不锈钢、铝及铝合金、铜及铜合金等有色金属的有效方法。最大切割厚度可达到 180~200mm。现已推广用于碳钢的切割,目前已用来切割厚度 35mm 以下的低碳钢和低合金结构钢
同时利用电弧热和氧化反应热的切割法	氧-弧切割 利用电弧热加热切割区,借助氧流使金属燃烧,并将熔渣和熔化金属排除,从而形成割缝的切割方法。与气割相比,其特点是切割速度快,但切断面的质量较差	主要适用于金属的穿孔和水下切割
利用光能的切割法	激光切割 利用聚集成直径很小的激光束照射切割区,使被切割材料迅速地升华和熔化,从而形成割缝的切割方法	主要适用于切割薄金属以及陶瓷、塑料和布等非金属,是一种高速、高质量、高精度切割法,正在不断发展之中

工业上应用的热切割法主要是氧气切割、等离子弧切割和激光切割等。有些热切割方法是由于某些材料难以或不能用氧气切割而开发的,随着等离子弧切割和激光切割的应用,有些切割方法在实际应用中基本上已被淘汰(如钨极电弧切割、熔化极电弧切割等)。利用动能的水射流切割,在切割过程中工件不受热和无热变形,具有独特的优点,近年来发展迅速并已得到广泛应用。

电火花加工的切割速度较慢,但切割精度高,辅以数控装置,在机械制造中是模具加工和试样精密切割的一种有效的切割方法。

按照加工方式的不同,切割方法又可分类如下。

- ① 手工切割 整个切割过程均用手工操作完成。
- ② 半机械化切割 整个切割操作过程中部分采用机械化方式实施。
- ③ 机械化切割 整个切割操作过程都采用机械化方式进行。
- ④ 自动化切割 整个切割操作过程,包括一切辅助作业(如更换工件),都能自动地完成。

各种切割方法的原理、特点及主要用途见表 1.3。

表 1.3 各种切割方法的原理、特点及主要用途

切割方法	原 理 及 特 点	主 要 用 途
激光切割	利用高能量密度激光束的加热作用使材料汽化、熔化或剧烈氧化进行切割。切口窄、切割热变形极小、切割速度快,是一种能实施高精度、高速度的自动化切割方法。有广泛的发展前景。目前切割常用的激光器主要是 CO ₂ 气体激光器和钇铝石榴石(YAG)固体激光器	用于切割金属材料和各种非金属材料。常用的钢铁材料一般采用氧作辅助气体,以提高切割效率;对某些要求避免切割面氧化的金属,则采用非氧化性或惰性气体
氧气切割	利用铁在氧中的燃烧反应及反应热进行切割的方法。设备简单,操作灵活性好,切割质量良好,但切割速度低(通常在 1m/min 以下)。切割件变形量大、尺寸精度不高	一直是切割碳素钢的最常用的方法,薄板难以实行机械化切割。最大切割厚度可达 4m 左右
氧-熔剂切割	在切割氧流中添加铁粉等熔剂,借助铁粉的燃烧热补充切割所需的热量,或在切割氧流中加入磨料,借以除去高熔点氧化物以实现气割的一种特殊方法	主要用于不锈钢、铸铁等金属以及浇冒口和钢渣等的切割(随着等离子弧切割的发展和运用,这种切割方法的使用范围已缩小)
电弧-氧切割	利用中空管状割条与工件间产生的电弧热和从割条内喷出的氧与金属反应热进行切割的方法。切割速度比气割快,但切割面质量差	现在是水下切割金属的一种主要方法
等离子弧切割	利用小孔径喷嘴压缩电弧所形成的高温、高速等离子流作热源进行熔割的方法。切割速度快(在 1~5m/min 范围)、切割热变形小、切割面光洁,缺点是切口宽度较大,切割面倾斜(最近已部分得到改善)	这种切割方法有等离子弧和等离子焰流两种切割方式。等离子弧切割通常用于切割金属材料,切割厚度 25~30mm 以下的碳钢经济性好。对不锈钢的最大切割厚度为 180~200mm
钨极电弧切割	利用 TIG 焊接装置借助钨极与工件间电弧的热量进行熔割	现在已很少使用
熔化极电弧切割	利用 MIG 焊接装置借助熔化极与工件间电弧的热量进行熔割	现在陆上切割中已很少使用,但作为水下切割的有效方法而获得应用
碳弧切割	即电弧-压缩空气切割。利用碳棒与工件间产生的电弧热使金属熔化,同时借助压缩空气将熔化金属吹除	用于切割铸铁、有色金属及其合金。这种切割方法的变种(碳弧气刨)广泛用于焊接接头坡口加工、焊缝背面清根等
电弧锯切割	利用高速运动的圆盘或带状电极与工件间发生的大电流(数千至数万安培)电弧使工件熔化,借助电极的运动将熔化金属去除	主要用于核反应堆中不锈钢零部件的切割和解体
电火花切割	将被切割工件浸入绝缘性液体中,借助反复短时放电来削除金属的一种精密切割方法。切割时采用直径 50~300 μ m 的钼丝并以一定的速度进给,使钼丝与工件间断续地发生火花放电。加工速度慢,但能实现高精度(表面的平面度 3~5 μ m)切割	是模具加工和试样精密切割的有效方法。近年来,切割加工速度明显提高,现在电火花切割的最大加工速度可达 200~250mm/min
阳极切割	将旋转的薄钢质圆盘接直流电源的阴极,工件接阳极,用水玻璃溶液等作介质,通过断续的电弧进行切割	用于切割高硬度淬火钢、硬质合金等

续表

切割方法	原 理 及 特 点	主 要 用 途
水射流切割(纯水型)	将压力 196~490MPa 的高压水从孔径 0.1~0.5mm 的喷嘴孔喷出,利用这种水射流的机械冲击作用对材料进行切割。因完全不使用热源,对切口无热影响,也没有热变形	能对纸张、塑料等进行高效切割,但较难切割金属材料
水射流切割(加磨料型)	在纯水射流中加入金刚砂、铝氧砂等粉状磨料,借助这些磨料的磨削作用提高切割性能的水射流切割方法。切割精度好,但切割速度不及热切割法。设备价格高	能有效地切割金属、陶瓷和混凝土等硬质材料及复合材料。针对不锈钢,目前最大切割厚度可达 300mm
气射流切割	在压缩空气中混合以磨料,利用这种气射流的能量和磨削作用进行切割和磨削。与加磨料水射流方法相比,加工能力差	仅适用于清除零部件上的飞边等
电子束切割	利用高密度电子束装置进行切割的方法。切口宽度可小至 1 μ m 以下,能实行高速高精度切割。设备复杂且需在真空室加工	能切割钢铁材料、有色金属和难熔合金等
电解切割	利用电解时金属的溶解进行的切割加工。与机械切割方法相比,加工精度差	对难磨削材料进行加工,效果较好

1.1.2 切割技术及应用现状

切割技术几乎是和焊接技术同时诞生和发展的一对相互促进的“孪生兄弟”,它们构成了金属和非金属材料的“一裁一缝”。现在切割的材料已由原来的碳钢、低合金钢发展到高合金钢、不锈钢、铜、铝等各种有色金属和陶瓷、玻璃等非金属材料。

切割技术在工业生产中有两个特点:一是与焊接生产的配套性;二是作为分离切割的独立性。与焊接生产配套,作为焊接生产的第一道加工工序,切割的效率、质量和成本将直接影响整体焊接工程结构的效率、质量和成本。此外,在冶金、重型机器等工业生产中,对大截面铸锻件的平头、去尾、缺陷清理、重大锻件的毛坯准备、连铸连轧板坯的在线切割、大型废旧设备的解体等,切割技术都发挥了独特的不可缺少的重要作用。

近年来,由于机械工业飞速发展的需求与先进技术的引进,我国切割技术无论在新工艺的开发方面,还是在新能源的利用方面都有了长足的进展。机械化、半自动化切割技术的发展,使得切割技术可以代替部分机械加工。有些工件如用机械加工的方法或用锻压的方法要经过多道工序、几天时间才能加工出来,而采用切割的方法几十分钟就可完成。大大提高了工作效率,还可以节省大量金属材料。

(1) 气体火焰切割

气体火焰切割是热切割技术中最早被采用和最常用的工艺方法,大量的低碳钢板和工件是采用这种方法切割的。这种切割方法具有设备简单、投资费用少、操作方便灵活、切割质量好,尤其是能够切割各种含曲线形状的零件和大厚度工件等一系列特点,自 1905 年进入工业应用以来,一直作为工业生产中切割碳钢和低合金钢的基本方法而被广泛使用。

气体火焰切割所采用的割炬应能:

- ① 产生一束小直径的高速氧流,使之在很小的范围内将金属氧化并去除;
- ② 围绕高速氧流有一圈火焰,把金属预热到燃烧温度。

用各种发生器由电石产生乙炔用于金属的火焰切割,在我国一直是占统治地位的传统切

割工艺。20 世纪 80 年代初之前,我国绝大多数工矿企业使用的乙炔,都是用分散的移动式乙炔发生器来产生,危险性很大,浪费也很严重。20 世纪 80 年代中期以后,我国开始应用瓶装的溶解乙炔,全国陆续建了一批各种规模的溶解乙炔站,到 20 世纪 90 年代已基本普及,全国的溶解乙炔站已经有 500~600 多家。移动式乙炔发生器基本上被淘汰。瓶装溶解乙炔的普及应用大大提高了乙炔使用的安全性,降低了环境污染,提高了切割质量,推动了我国切割技术的发展。

20 世纪 90 年代以后,由于市场经济及我国石油工业的发展,乙炔的价格越来越贵。尤其是受日本影响,我国开始逐步推广使用丙烷、丙烯等石油气体代替乙炔用于火焰切割。一些单位还进行了乙炔-丙烷、乙炔-丙烯等混合燃气的研究,这些气体的应用在安全性、经济性方面具有显著的效益。

割炬的移动速度要保证能进行连续的切割。因为气流和火焰都是轴对称的,故可以向任何方向移动割炬,可以很方便地进行曲线形状的切割。切割质量取决于割嘴类型、割嘴与板件的距离、氧气及预热气体的流速以及切割速度等,所有这些因素都是根据被切割材料和厚度选定的。乙炔、丙烷、天然气或化学工业的副产品等大多数燃料气体,都有相应的割嘴可以使用。

通过割炬和喷嘴的改进,使切割速度和质量有了进一步提高和改善。随着科学技术的进步,在氧气切割基础上又相继开发出各种机械化、自动化切割设备,特别是数控切割机的出现,使切割质量和效率大幅度提高,解决了各种形状复杂零件的自动切割。这一时期随着造船业的高速增长,钢材的切割加工量大增,使氧气切割的应用进入一个全盛时期。

从 20 世纪 70 年代开始,适用于碳素钢的、切割中薄板速度大大高于氧气切割的等离子弧切割技术大规模进入工业应用,氧气切割独占的局面逐步被打破。至 20 世纪 80 年代末,美国工业生产中等离子弧切割和氧气切割的使用量已达到各占一半的程度。但从总体上说,目前在世界各国厚度 5mm 以上碳素钢的切割中,氧气切割的比重仍占 80% 以上。

从发展趋势看,氧气切割将继续被等离子弧切割或激光切割所代替而进一步缩小其应用范围。但是,氧气切割设备简单、价格低(特别是割炬的价格低廉)。因此,氧气切割至少在以下几种应用场合仍具有一定的优势:

① 在厚度 100mm 以上钢材的切割中,只有氧气切割方法能胜任,其他热切割方法难以与之竞争;

② 经常使用多割炬同时切割同形状零件和含公共切割线的矩形零件的场合(如从大张钢板上切割板条),仍具有良好的经济性;

③ 适于切割焊接坡口和各种型材。

近年来,在燃气中以乙炔为基础,先后开发了丙烷、液化石油气、焦炉煤气、天然气等多种可燃气体,并根据各种气体的不同特性研制出最佳参数的专用切割机及其附件。通过推广应用表明,以丙烷为代表的新开发燃气在气体火焰热切割中代替乙炔,不仅可提高工件的切割质量,较大程度地防止回火,而且有明显的节能效果,为我国在气体火焰热切割领域中的燃气能源趋向多元化,开辟了广阔前景。

在氧气的使用上,原先火焰切割用的氧气几乎全是瓶装气态氧,近年来,液态氧的使用逐渐增加。现在世界工业发达国家液态氧使用已达到 60%,大量集中使用氧气的地方几乎都使用液态氧,分散用量少的地方使用瓶装气态氧。

(2) 等离子弧切割

等离子弧切割是 20 世纪 50 年代中期开始投入工业应用的,当时是以 Ar 作为工作气体,主要用于切割铝及其合金。以后逐步开发出用 N_2 、 $N_2 + H_2$ 和 $Ar + H_2$ 等作为工作气体的切割方法,使切割能力提高、成本降低,并被用来切割不锈钢、铜及其合金等有色金属,成为一种切割有色金属的有效切割方法而获得推广应用。

但是,采用这些惰性气体的等离子弧切割用于加工碳素钢时,因切割面质量很差、切割速度不快,未能得到有效的应用。

20 世纪 60 年代后期开发出了空气等离子弧切割技术。这种方法用于切割碳素钢薄板不仅切割面的质量好,而且切割速度也比氧气切割方法快得多,因此很快在工业中得到应用,使等离子弧切割进入加工碳素钢的领域。随后又研制成功了更适合碳钢切割的氧等离子弧和水压缩等离子弧切割技术。

虽然等离子弧切割设备投资大、易耗件寿命短而且价格昂贵,但综合分析结果认为:等离子弧切割厚度 25~30mm 以下的碳素钢是有利的。于是从 20 世纪 70 年代起,在国外一些钢材加工量大的专业厂和大中型造船厂相继采用了数控等离子弧切割代替氧气切割用来加工碳素钢。欧洲造船厂用水压缩等离子弧切割代替气割,并使用充水式切割平台以减少有害烟尘。

20 世纪 80 年代以后,这种倾向得到进一步发展,国内一些大型企业也配备了数控等离子弧切割机,并将水压缩等离子弧切割机用于切割碳钢和不锈钢。但是,这些等离子弧切割装置都安装在大型数控切割机上,所用的切割电流多在 150A 以上,不适合中、小企业应用。

1984 年杭州国际焊接展览会首次展出了美国的两台空气等离子切割机,使我国的研究人员受到很大启发,随后几年全国掀起一股仿制和开发空气等离子切割机的热潮。为了适合市场的需求,20 世纪 80 年代中、后期开发了小电流空气等离子弧切割技术,切割电流在 100A 以下,甚至低于 10A。采用空气冷却割炬和喷嘴,使设备简化、价格降低,可用手动方式调节,也可安装在半自动切割机、光电跟踪切割机和小型数控切割机上,适用于切割厚度不大的碳钢、不锈钢,甚至厚度 1mm 以下的极薄板,适应了中、小企业的需求。

空气等离子弧切割机因其离子气与切割气均采用压缩空气而受到用户的欢迎。进入 20 世纪 90 年代,我国形成了批量生产并稳定的应用于生产。我国目前空气等离子弧切割机生产厂家已发展至十几家,这些切割机普遍被应用于各部门的有色金属、不锈钢及碳钢、低合金钢的切割。

为了提高切割面质量,保证被切割零件的尺寸公差,以及改善操作者的劳动环境,实现远距离操作,还研制出一系列的为等离子弧切割配套的小型切割设备,实现了等离子弧切割的半自动化。

近年来,我国大力发展小电流空气等离子弧切割技术,使用范围正在不断扩大。逆变式空气等离子弧切割机的开发为节约能源创造了有利条件。我国普通等离子弧切割设备的生产能力较强,已能制造切割厚度达 200mm 的不锈钢、铝等材料的切割设备与切割枪。

(3) 激光切割

激光切割具有热变形和热影响区小、切割精度高、适合于柔性生产等特点,在加工各种金属和非金属高精度零件中应用日益增多。目前应用最多的行业是汽车制造业,我国从国外引进的激光切割机在 20 世纪 80 年代末就应用于汽车制造业中,主要用于切割车体的薄板弧